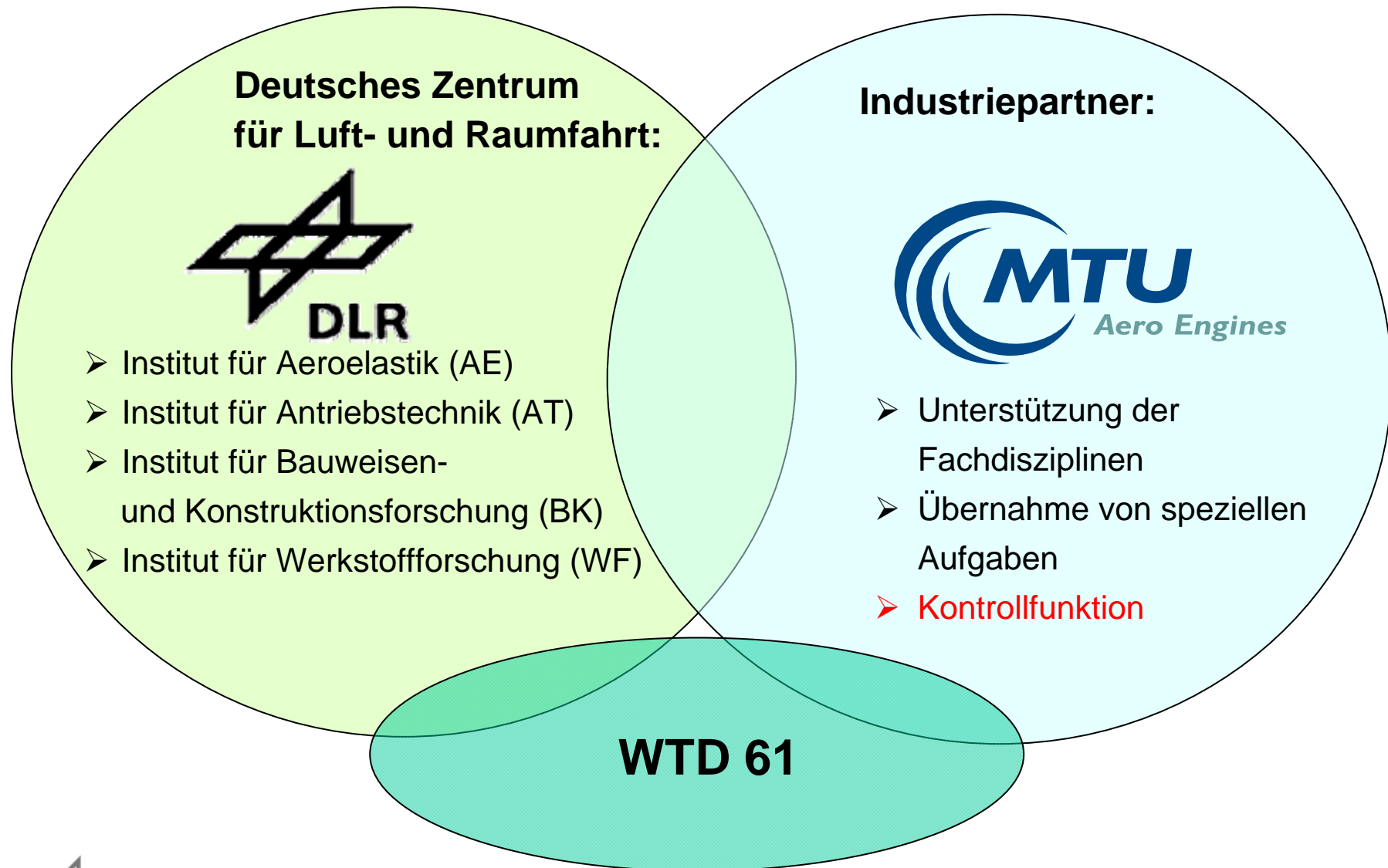


AeroLight – Status der Umsetzung einer neuen Verdichterbauweise

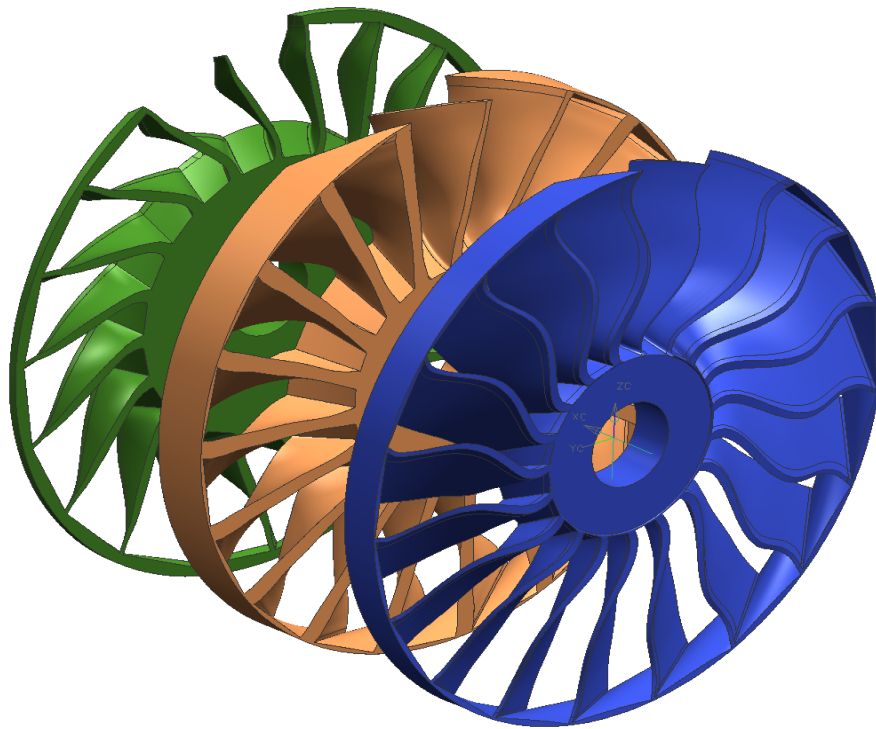
Frank Kocian (BK), Ulrich Siller (AT), Dr. Joachim Hausmann (WF),
Dr. Joachim Belz (AE), Maik Spanier (SHT)

Werkstoff-Kolloquium 2009 in Köln

Multidisziplinäres Projekt AeroLight



Kurzbeschreibung der technologischen Herausforderungen

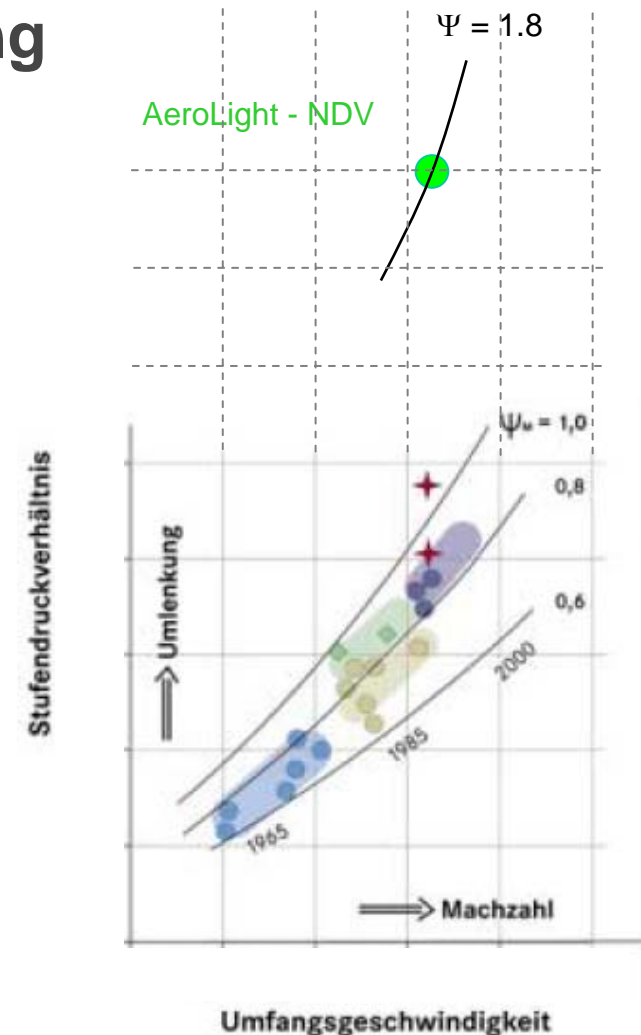


Die Bauweise des Rotors neuer Technologie besteht in der Fügung einzelner, vorgefertigter Rotorscheiben mittels Verlöten der Einzelsegmente

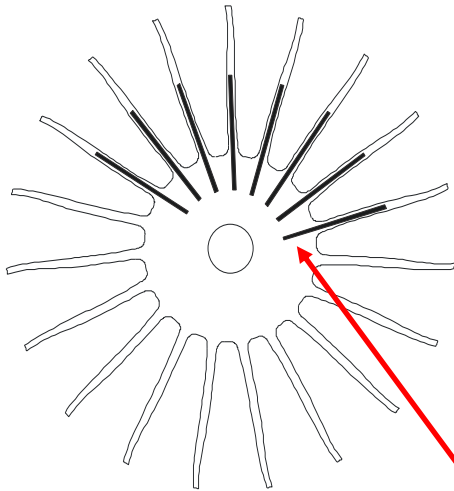
- Umsetzung extremer aerodynamischer Anforderungen an einen Verdichter in den Bereichen Druckverhältnis, Wirkungsgrad und Pumpgrenzabstand für verschiedene Betriebszustände
- Bereitstellung und Umsetzung einer adäquaten Leichtbauweise für Rotoren ohne Restriktionen für die Aerodynamik, mit Potenzial für einen Technologiesprung
- Bereitstellung von reproduzierbaren Materialkennwerten für die Fügeverbindungen und Entwicklung eines geeigneten, qualitätsgesicherten Fertigungsprozesses für die Herstellung des Rotors
- Zuverlässige mechanische und aeroelastische Auslegung des Verdichters unter Berücksichtigung der neuen Bauweise

Aerodynamische Herausforderung

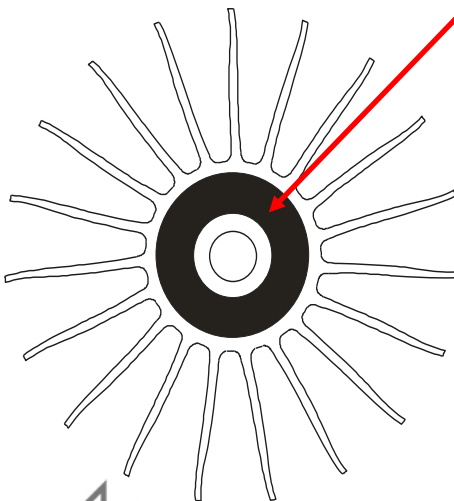
- Die Auslegungsrandbedingungen des AeroLight-Fans leiten sich ab von den Anforderungen an einen Antrieb eines unbemannten, militärischen Flugzeugs
- Das extrem hohe Stufendruckverhältnis im Auslegungspunkt übersteigt bei weitem alle bei MTU und DLR ausgelegten und auch experimentell validierten Verdichter
- Hohe Wirkungsgrad- und Stabilitätsforderungen sind zusätzlich zu erreichen
- Insgesamt eine hoch komplexe Auslegungsaufgabe, die ein multidisziplinäres Vorgehen erfordert, da bei den komplexen Geometrien Aerodynamik und Mechanik nur gemeinsam optimiert werden können



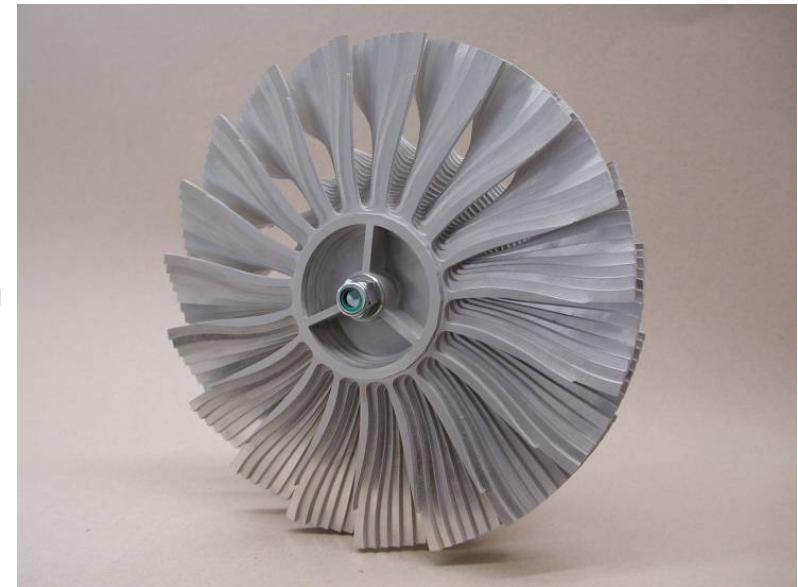
AeroLight – Neue Leichtbauweise für Verdichterrotoren



- Rotor wird durch Scheibenelemente aufgebaut
- Material ist durchgängig in Hauptbelastungsrichtung
- Nutzung von hybriden Bauweisen
- Untersuchungen von Fügetechniken als Schlüsseltechnologie

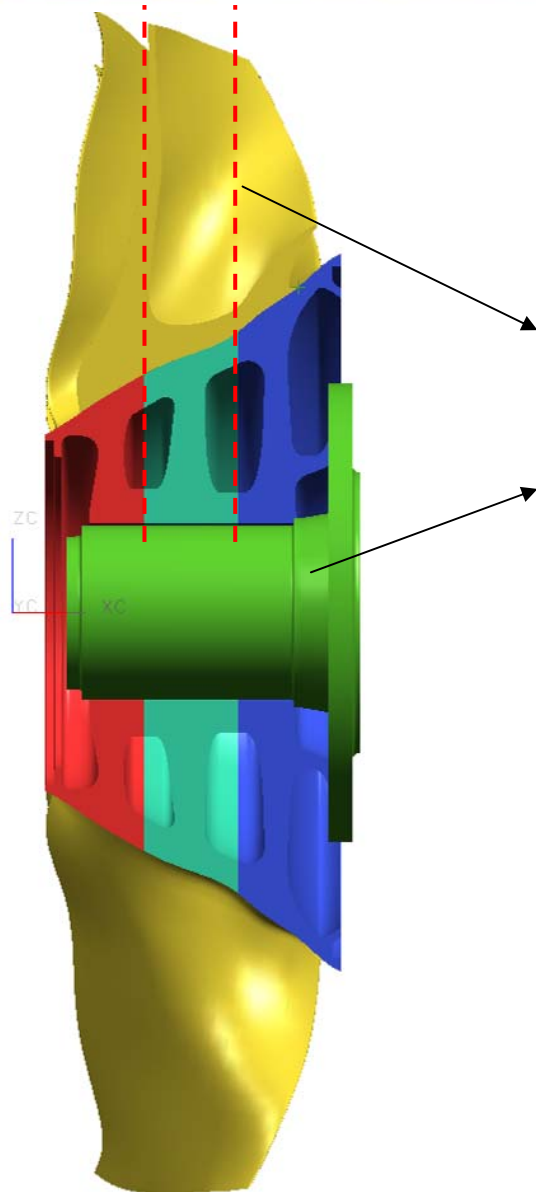


- Effizienter Einsatz von Verstärkungselementen
- Nutzung bereits erarbeiteter Technologien





Rotorkonzept

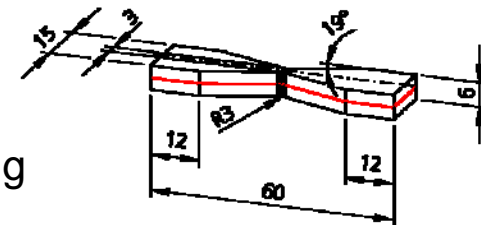
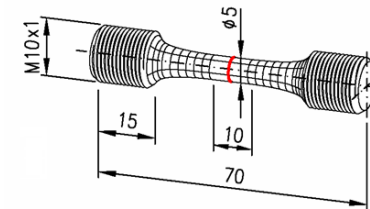
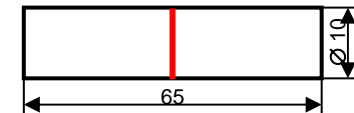


- Rotor mit zwei Lötenebenen, Dreistegscheibe und Hohlräumen
- Rotorlagerung zur Sicherheit für den Testbetrieb auf verlängerter Welle
- Auslegung erfolgt mit Blick auf genügend Tragfähigkeit voneinander getrennter einzelner Scheibensegmente (Schadensfall)
- Konzept dient zur Verifikation der Basistechnologie



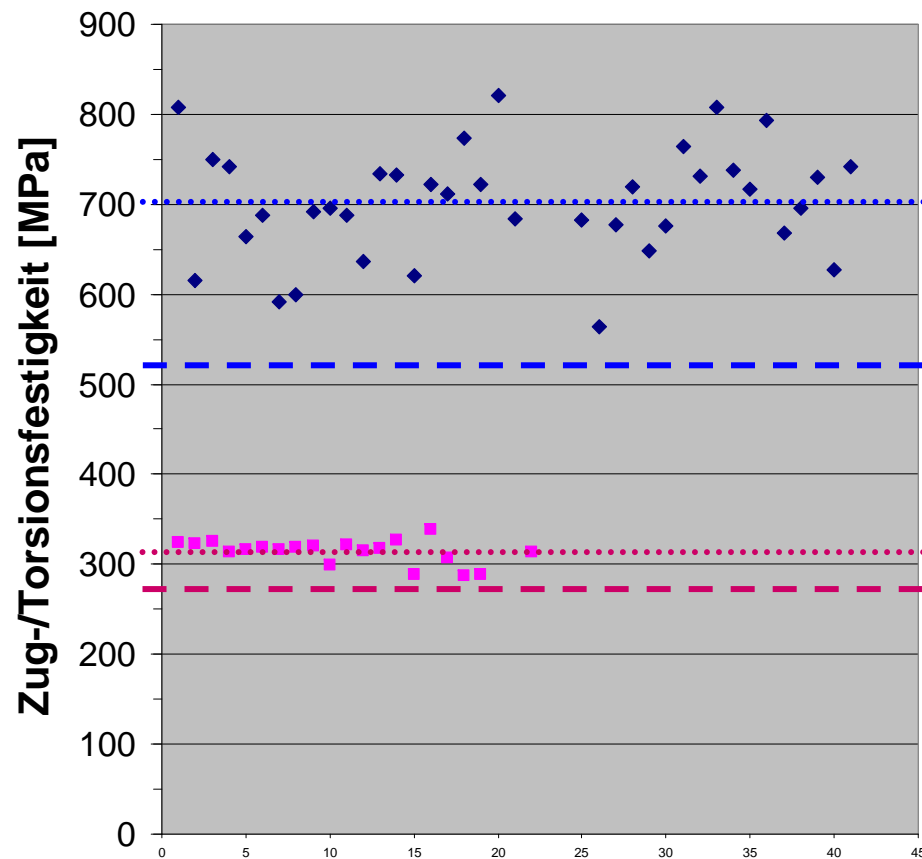
Fügetechnologie

- Verwendetes Lot Ag72Cu (72% Silber, 28% Kupfer)
- Verlötung erfolgt im Hochvakuum bei 820 °C
- Zur Verfügung stehende Techniken zur Lotbereitstellung
 - Folientechnik
 - Kaltgassprühtechnik
 - Galvanische Abscheidung der Lotbestandteile
- Favorisiertes Lötverfahren stellt die Verwendung von Lötfolien dar - maximale Festigkeiten wurden bei Verwendung der Lötfolien erreicht
- Drei Hauptbelastungen sind relevant für das Versagen der Lötverbindung
 - Schub
 - Zug
 - Rissbildung durch In-Plane Belastung
- Spezieller Vorrichtungsbau zur Verlötung der Bauteile notwendig



Statische Festigkeit von Lötverbindungen

Zug und Schub



Zugfestigkeit

Mittelwert = 702 MPa

Mittelwert - 3σ = 518 MPa

Torsionsfestigkeit

Mittelwert = 314 MPa

Mittelwert - 3σ = 273 MPa

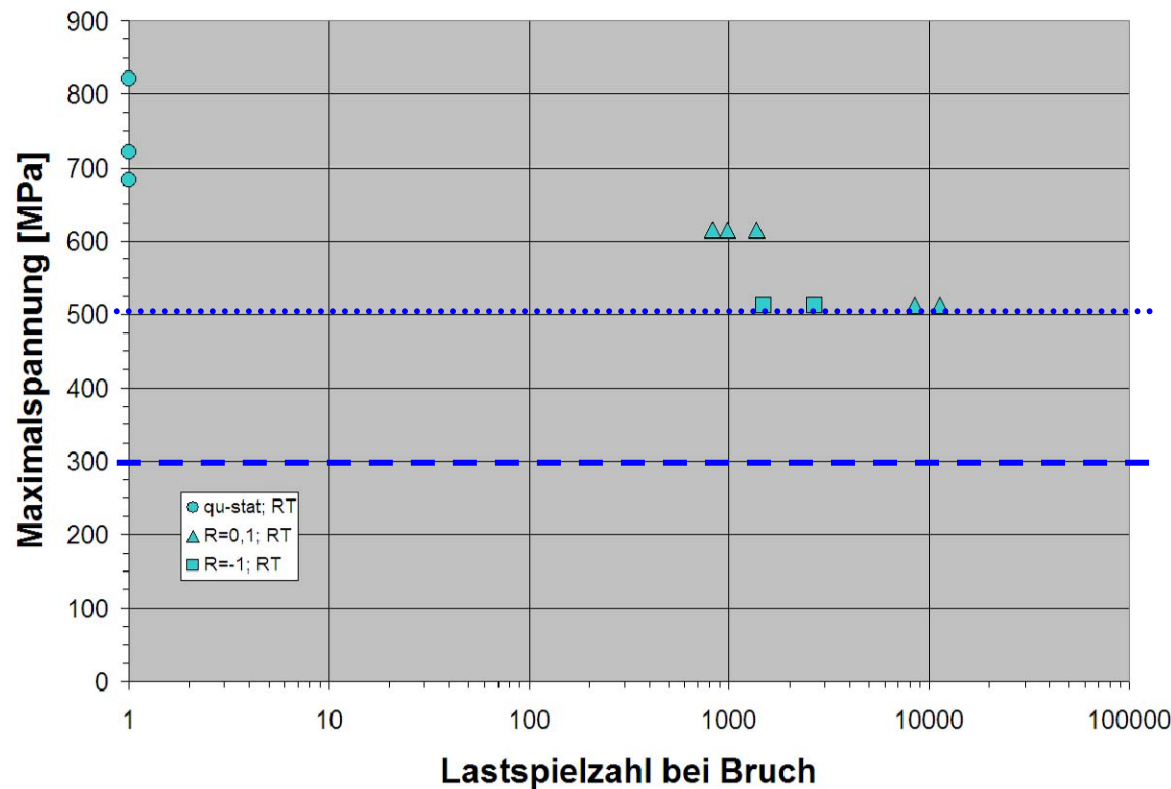
für Auslegung

Zug σ_{\max} = 500 MPa

Schub τ_{\max} = 270 MPa

Dynamische Festigkeit von Lötverbindungen

Ermüdung unter Normal- und Schubspannung



Auslegungswerte:

Angenommen wird

60% x stat. Festigkeit = Dauerfestigkeit

Zugfestigkeit = 500 MPa

Schubfestigkeit = 270 MPa

Zugdauerfestigkeit = 300 MPa

Schubdauerfestigkeit = 160 MPa

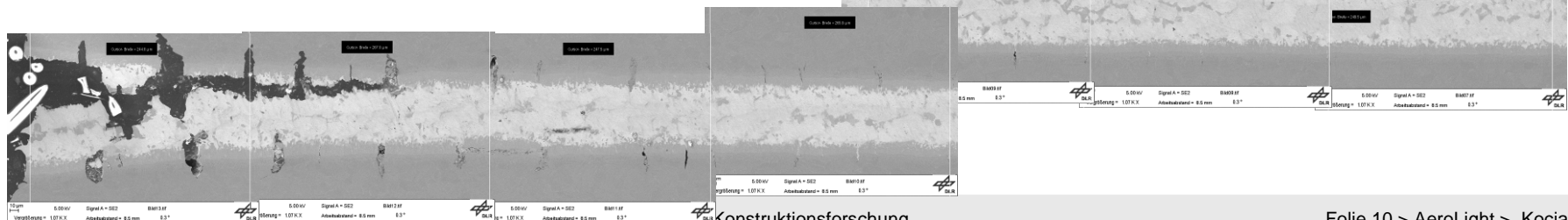
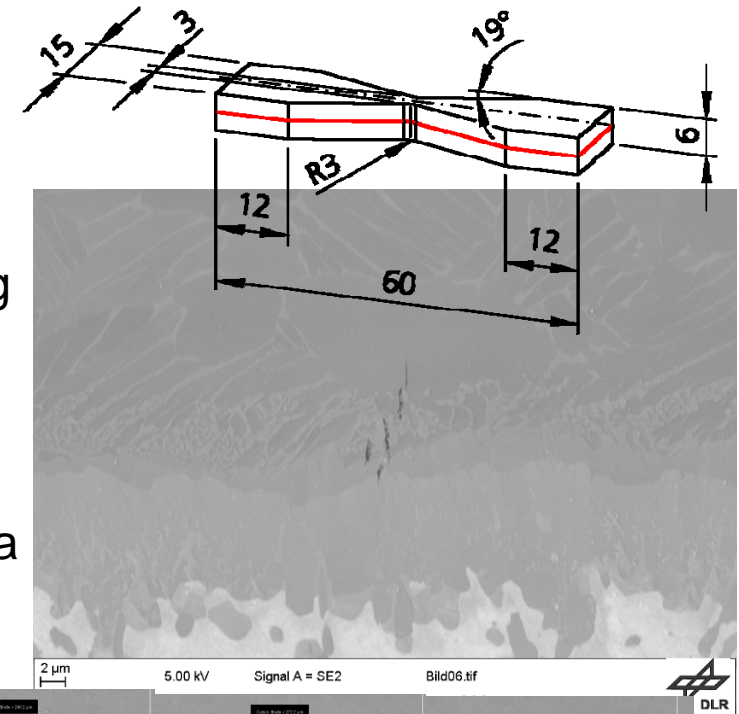
Torsions- und HCF-Versuche
laufen noch!



Versagen bei Zugbelastung in Lötebene

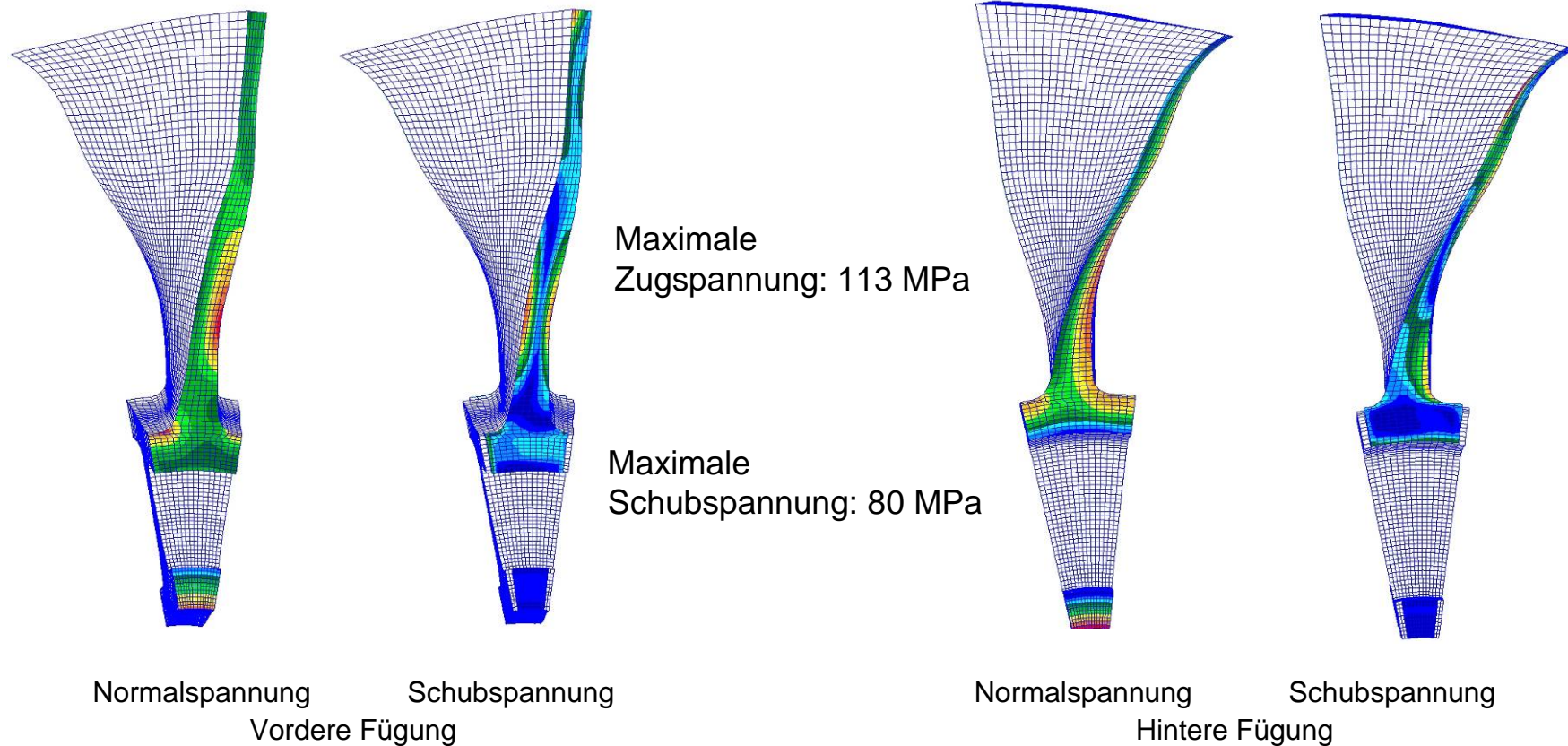
- Doppeltrapez-Probe mit linear ortsabhängig variabler Dehnung
 - REM-Analyse des Querschliffs nach Zugversuch
 - Auswertung des ersten Anrisses zur Ermittlung der maximal zulässigen Dehnung der intermetallischen Phasen
- ➔ Erste Rissbildung bei $\varepsilon = 0,66\%$, $\sigma = 790$ MPa
- ➔ Kritische Spannung im statischen Fall 790 MPa
- ➔ Dauerfestigkeit 400 MPa vorgegeben durch Grundmaterial

Doppel - Trapezprobe



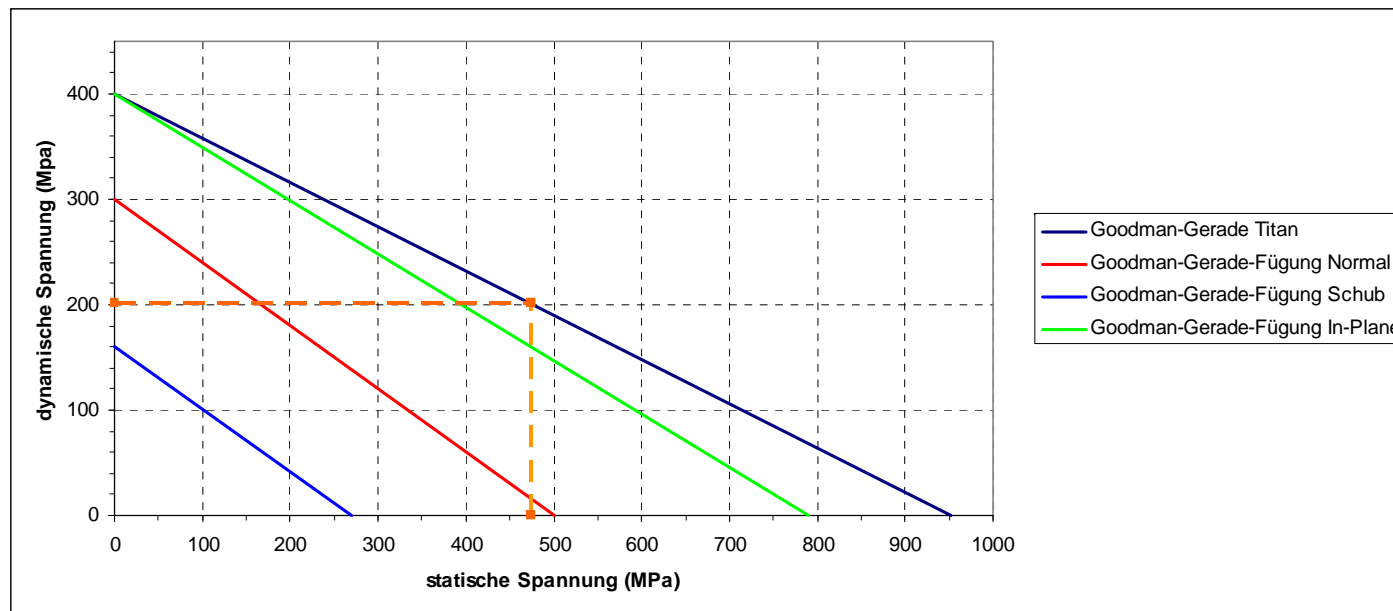
Statische Festigkeit in der Fügung

- Spannungen liegen deutlich unter den zulässigen Werten
- Kaum Überlagerungen der Maxima von Normal- und Schubspannungen



Bewertung der dynamischen Tragfähigkeit der Blattstruktur

- Ermittlung der dynamischen Tragfähigkeit für die Eigenmoden bei 106% Drehzahl und gegebener maximaler statischer Belastung an Hand des Goodman-Diagramms
- Weitere Auswertung erfolgt über die Ermittlung des $A \times f$ Wertes, der das Produkt aus der Frequenz und der an der Blattspitze auftretenden Amplitude bei Ausnutzung des dynamischen Resttragfähigkeitspotenzials darstellt



Bsp: Maximaler statischer Spannungswert im Rotor bei 106% Drehzahl:
474 MPa im Filletbereich (Titan) – dynamische Reserve von 201 MPa

A x f - Auswertung

- Auswertung erfolgt für jeden Knoten der gesamten Blisk (von Mises) bzw. der Fügefläche (Normal, Schub, In-Plane)
- Bei der Betrachtung der Fügefläche werden Interaktionen der Spannungskomponenten untereinander vernachlässigt

- A x f – Auswertung Titan

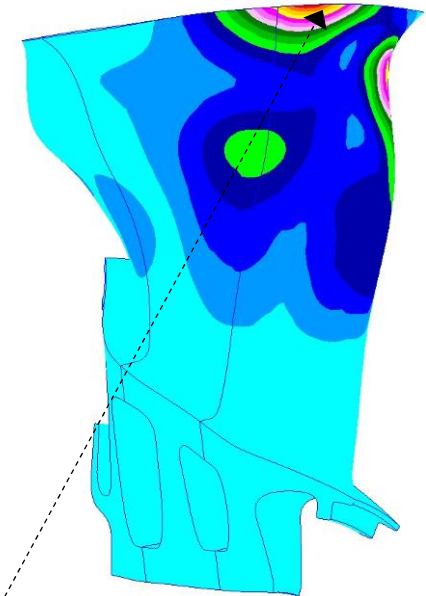
- Eigenmode 1T: von Mises: **A x f = 1,40**
- Eigenmode 1F: von Mises: A x f = 2,90

- A x f – Auswertung Fügung

- Eigenmode 1T:

Normalspannung:	A x f = 5,88
Schubspannung:	A x f = 1,79
In-Plane-Spg.:	A x f = 1,89
- Eigenmode 1F:

Normalspannung:	A x f = 5,45
Schubspannung:	A x f = 3,36
In-Plane-Spg.:	A x f = 3,13

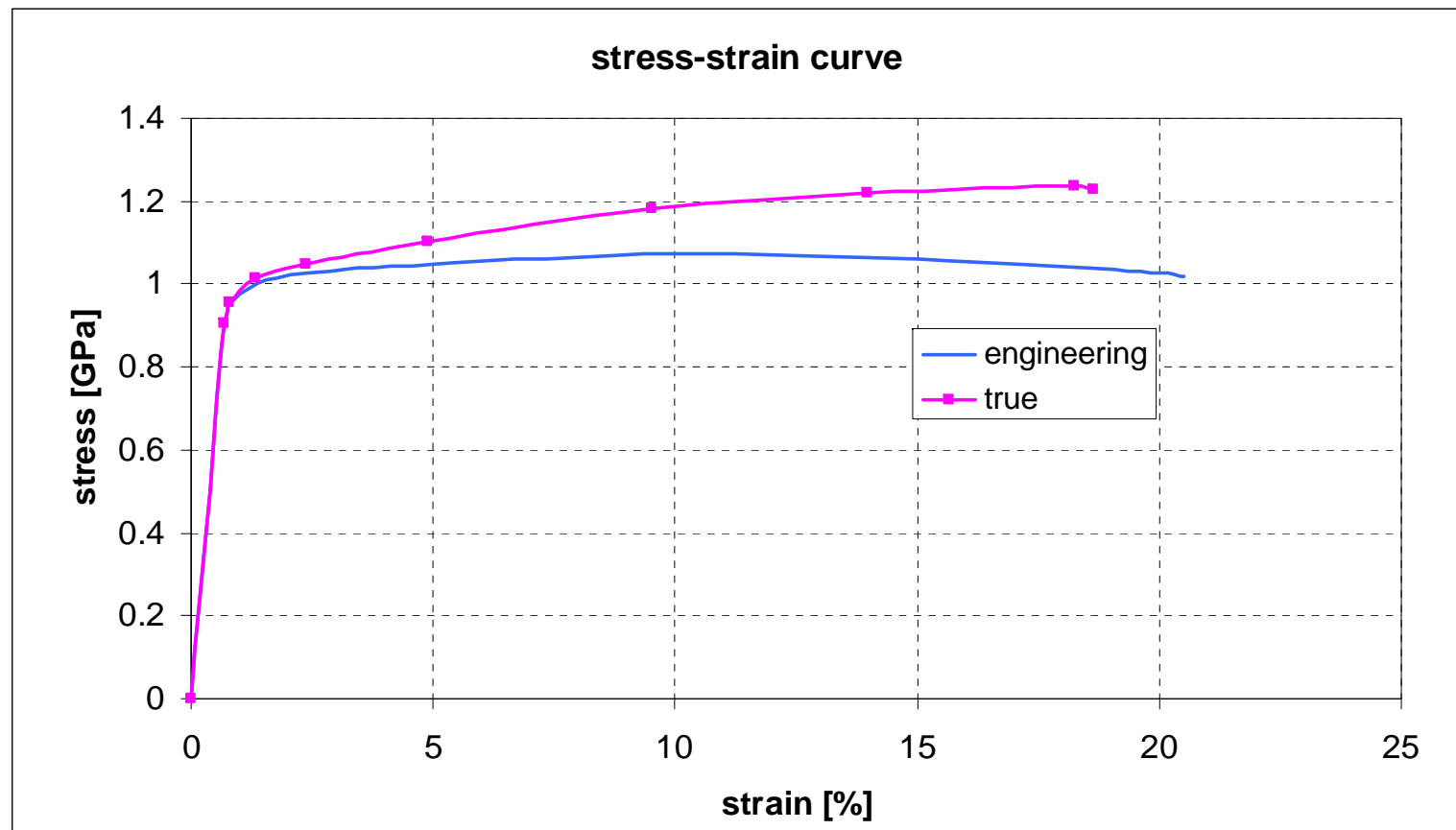


- Auswertung der A x f – Analyse zeigt, dass die Lötung nicht den kritischen Bereich der Konstruktion darstellt (Auswertung für 1T)



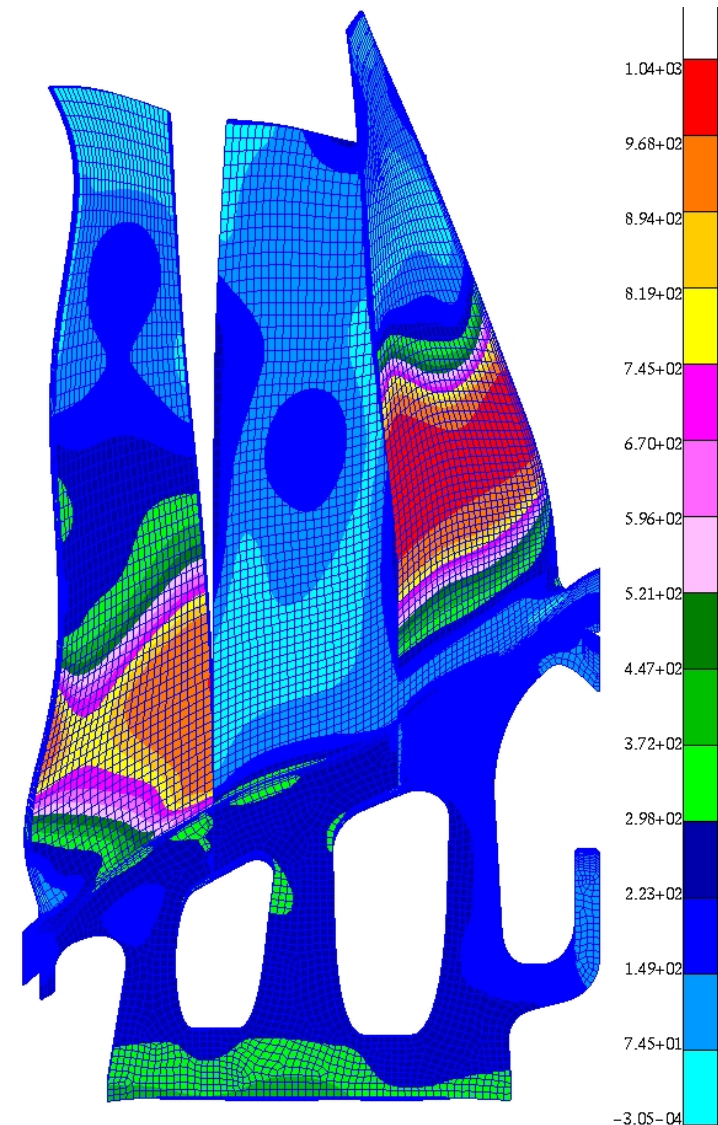
Spannung-Dehnungs-Kurve von Ti6242

Grundlage für die Bewertung des plastischen Verhaltens bei auftretenden Schäden



Plastische Deformation – Simulation eines Schadens

- Annahme: Lötung fällt im Bereich der Schaufel und des oberen Scheibensteges aus und ist bis in die Scheibe hinein geöffnet
- Berechnung bei 100% Drehzahl mit angenommenem real-plastischem Materialverhalten
- Die dabei auftretende maximale theoretische Aufweitung beträgt 12,0 mm, das wird bei der Gestaltung des Gehäuses und speziell des Anstreifbelages berücksichtigt
- Auftretende maximale plastische Dehnung von ca. 5%
- Maximalspannung: 1040 MPa (von Mises)
- Defekter Rotor verhält sich im Schadensfall nahezu wie einzelne Rotoren, die nicht berstgefährdet sind
- Die Kombination von Rotorlagerung auf einer durchgehenden Welle und das beschriebene Versagensverhalten sorgen für Schadensbegrenzung im Versagensfall



CNC Wasserstrahlen – Konfektionierung der Rohlinge

- Die Wasserstrahlmaschine wurde nach anfänglichen Problemen vermessen, verbessert und mit einem besseren Software Update versehen
- Die Maschine wird nun nach einem vom DLR vorgeschriebenen Fertigungsprotokoll gefahren - die Maschine wird dazu unter anderem vor jedem Schneidvorgang exakt ausgerichtet.
- Das Verfahren wurde durch Prüfmittel ergänzt und dadurch sicherer gemacht.
- Zuerst wird ein Rotor aus sehr spannungsarmen Aluminium wassergestrahlt, geprüft und gleich im Anschluss der Titanrotor geschnitten - so ist die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers sehr gering
- Ein minimaler Offset von 3mm zur Endkontur wurde eingerichtet, um Toleranzen aufzufangen und die nachfolgende Fräsbearbeitung sicherzustellen

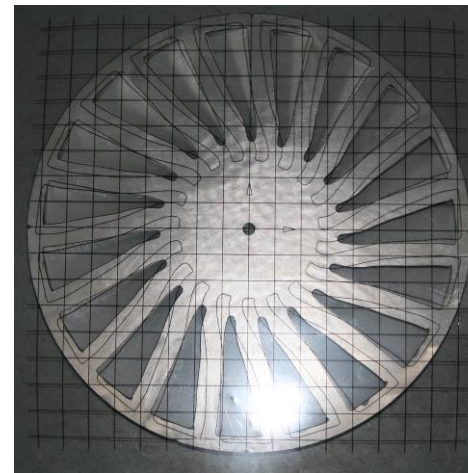


Bild oben:
Wasserstrahlen des
Titanrotors M1:2 zum
Rig-Rotor

Bild links:
Prüfschablone für Alu-
und Titanrotor

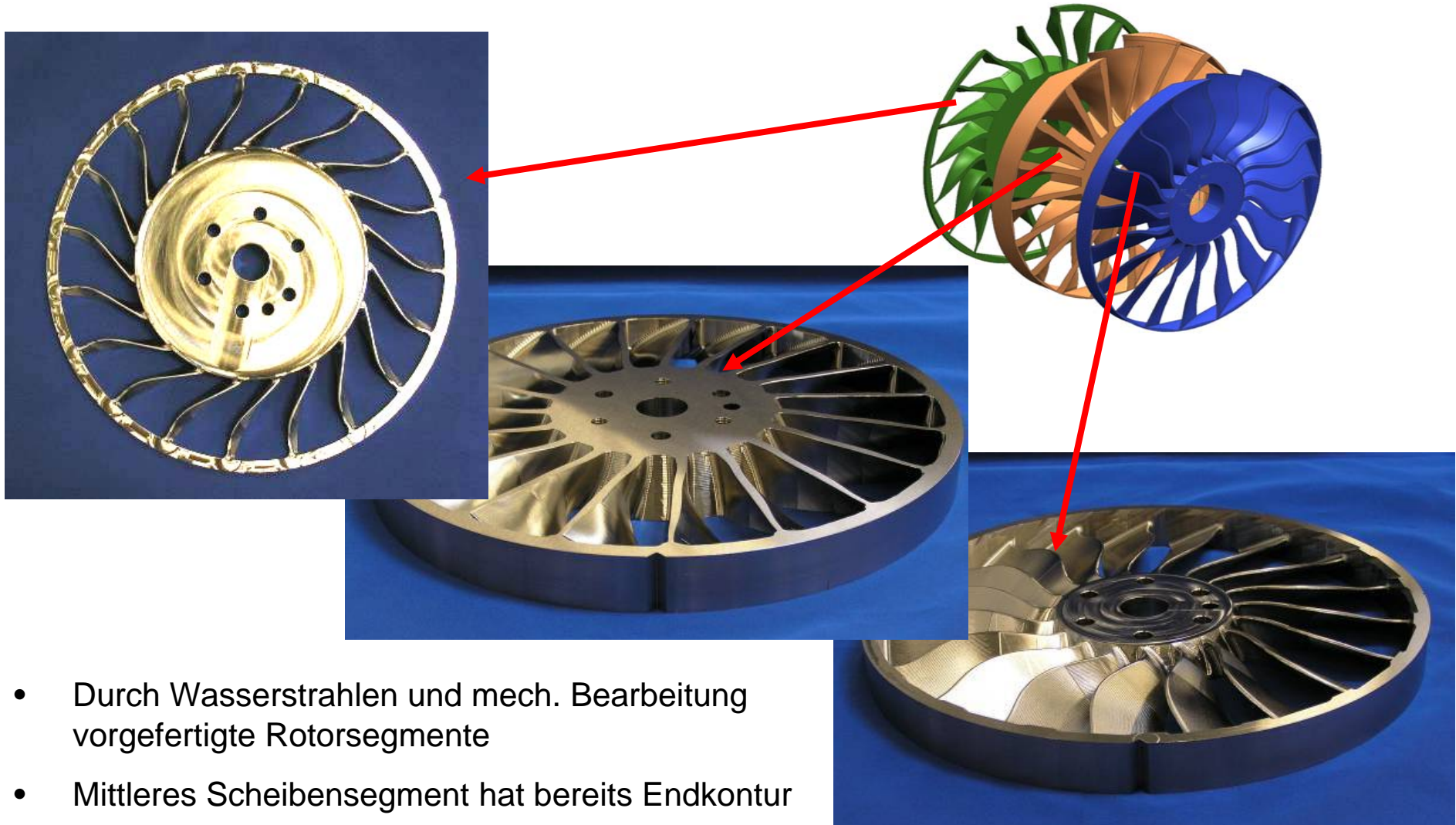
CNC Fräsen von Titanrotorscheiben

Version P25 M 1:2 zum Rigrotor

- Wassergestahlte Titanscheiben wurden als Versuchsobjekte für Testzwecke herangezogen
- CNC Daten wurden mit Catia V5 erstellt – die Scheiben anschließend im SHT gefräst
- Frässtrategien wurden entwickelt und sind einsatzbereit – Fräsparameter müssen noch mit der MTU abgeglichen werden
- Catia V5 CAM hat sich nicht vollständig für die Aufgabe bewährt, da es an softwarebedingte Grenzen gestoßen ist
- Die Software „Hypermill“ der Firma „Open Mind“ wurde im Projekt beschafft
- Optimierte CNC Programmierung erfolgt mit Unterstützung der Firma „Open Mind“



Vorbereitete Rotorscheiben



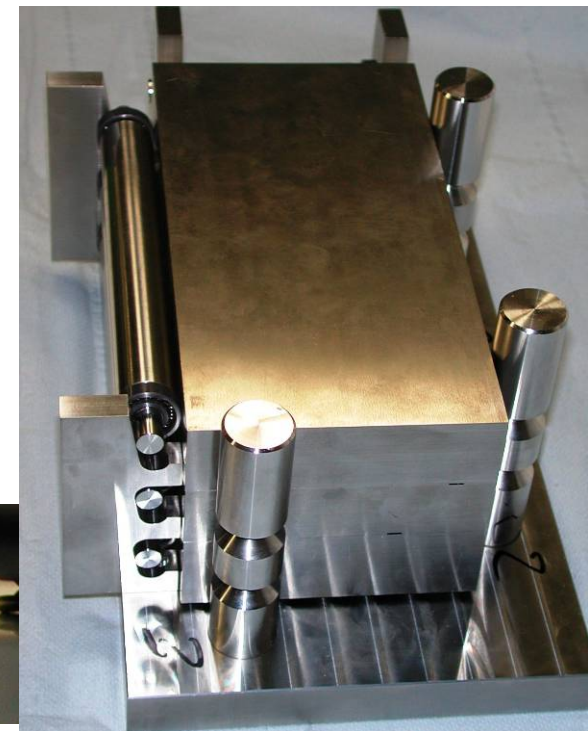
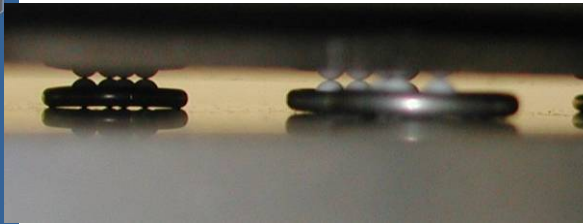
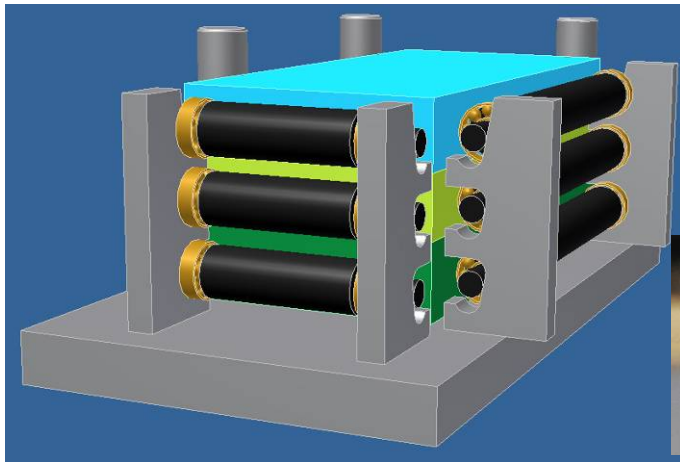
- Durch Wasserstrahlen und mech. Bearbeitung vorgefertigte Rotorsegmente
- Mittleres Scheibensegment hat bereits Endkontur



Vorgehensweise beim Löten des Rotors am Beispiel der Verlötung von Platten

Parameter für das Vakuumfügen:

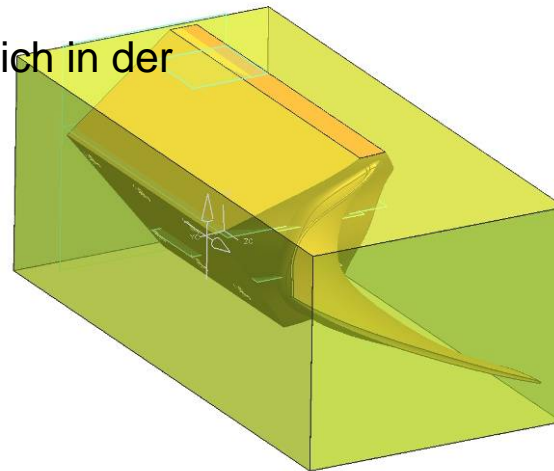
- Lotmaterial (Zusammensetzung und Abmessung)
- Vorbehandlung der Fügefläche (Reinheit und Ebenheit)
- Fügeteilpositionierung
- T-t-Zyklus (im Ofen und im Bauteil)
- nachträgliche Wärmebehandlung
- Kantendesign





CNC Fräsen

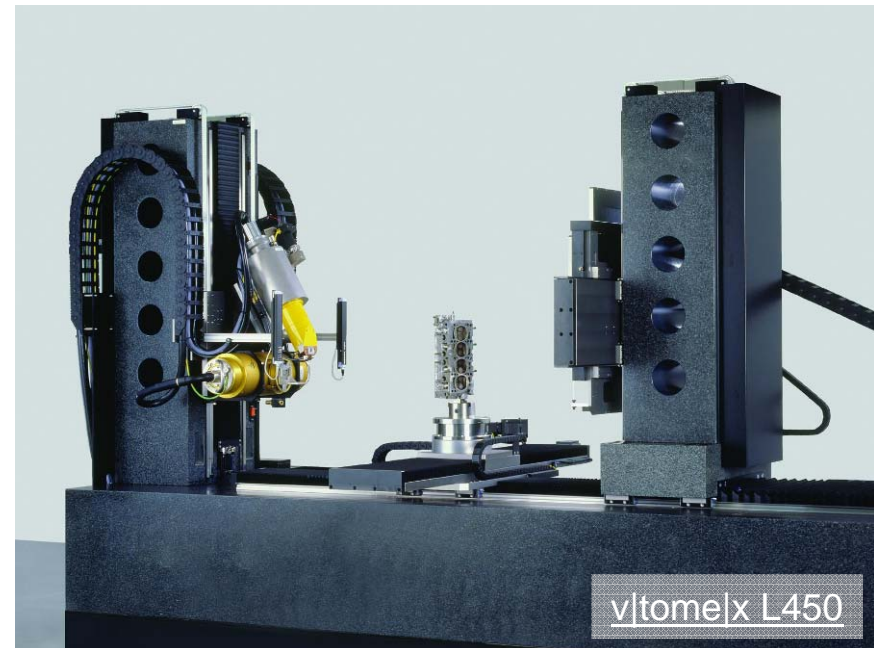
- Fräsversuche wurden mit einem aus drei Platten gelöteten Titanblock durchgeführt. Dabei entstand eine erste Einzelschaukel des Rotors Version P25
- Die Rundherum-Bearbeitung der Einzelschaukel zeigte keine Probleme
- Die Lötfehler wurden anhand von CT-Aufnahmen lokalisiert
- Shakerversuche werden unternommen, um speziell die Lötverbindung zu untersuchen
- Eine zweite Schaukel befindet sich in der Herstellung



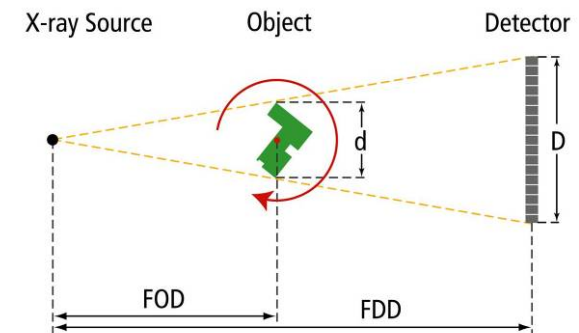
Qualitätssicherung: Zerstörungsfreie Prüfmethoden

CT-Großanlage – [v|tome|x L450](#)

- Röntgenröhren:
240 kV Mikrofokus/450 kV Minifokus
- Flächendetektor:
2048 x 2048 Pixel à 0,2 mm (16 Bit)
- Max. Voxel-Auflösung:
ca. 5 μm
(für AeroLight Rotor ca. 100 μm)
- Erfassbarer Bauteilbereich:
 $\varnothing = 800 \text{ mm}$, $H = 1000 \text{ mm}$
- Max. Bauteilgröße:
ca. 1000 x 2000 mm (B x H)
- Bauteilgewicht:
bis zu 100 kg
- Hersteller:
Phoenix x-ray

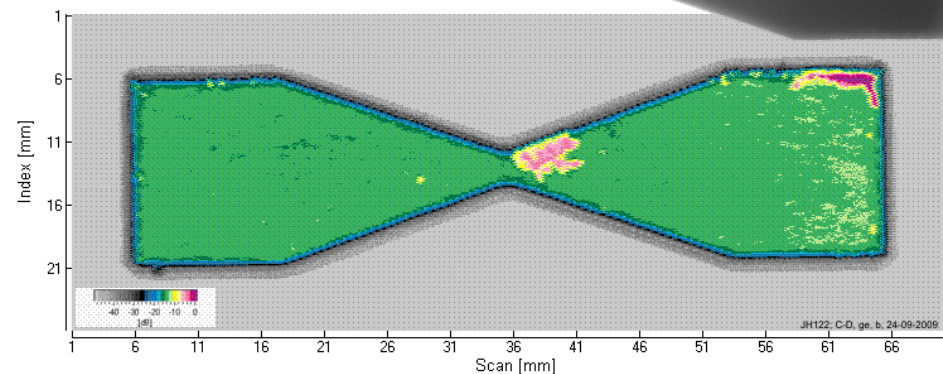
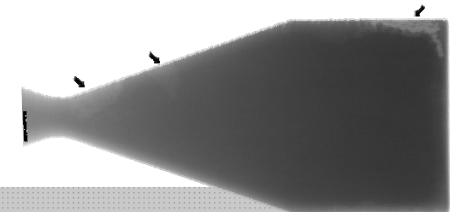
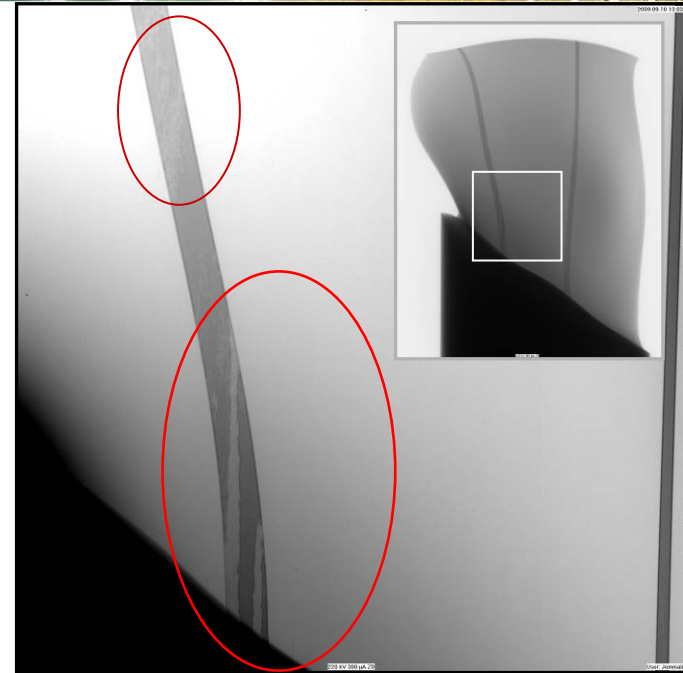


Messaufbau

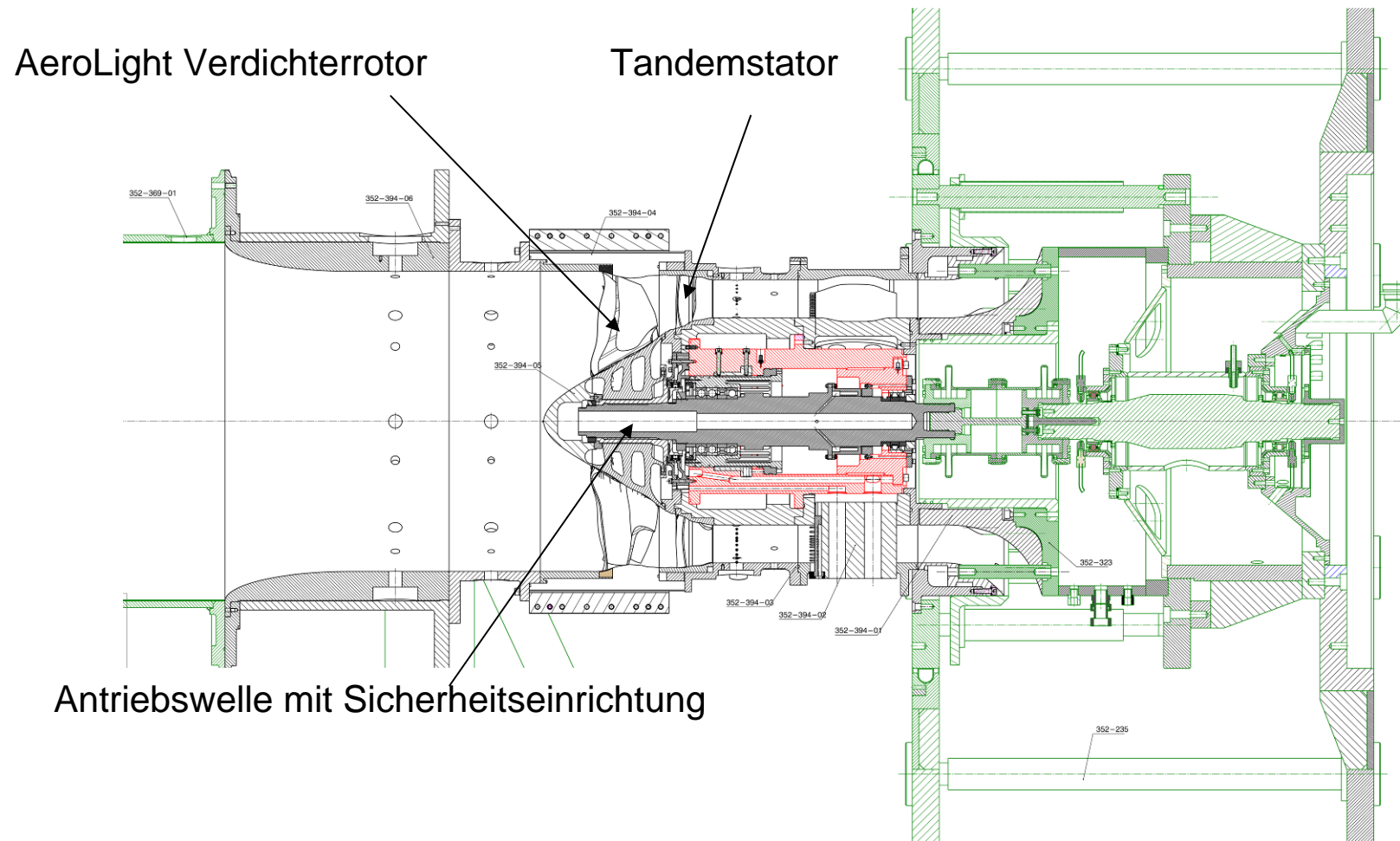


Qualitätssicherung des Rotors

- Röntgen-CT (X-CT) für Schaufelblatt sehr gut geeignet, für Scheibenbereich zu schwach
- Neutronendurchstrahlung stärker, aber Auflösung zu gering
- Ultraschall (US) liefert gute Auflösung und sichere Erkennung bei senkrechter Einstrahlung → Grenzen bei längeren Schallstrecken werden noch untersucht
- Fazit:
 - X-CT für Blattbereich
 - US für Scheibenbereich
 - Farbeindringprüfung während Betrieb



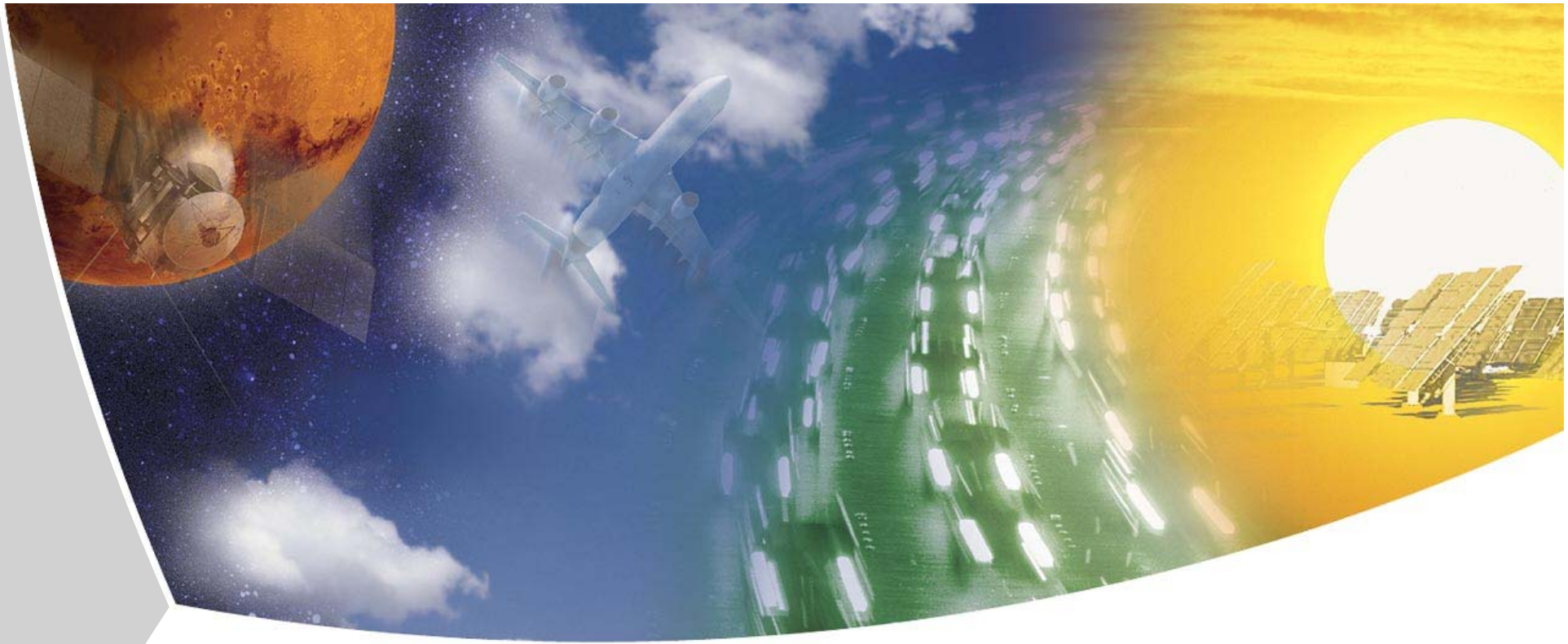
Integration des Verdichters in den Prüfstand M2VP





Zusammenfassung / Ausblick

- Aerodynamik hat geometrische Gestaltungsfreiheit zur Erschließung neuer Leistungspotenziale für die Verdichterbeschaufelung genutzt
- Strukturelle Integrität des Rotors für den Test auf einem Rig ist weitgehend nachgewiesen
- Werkstoff-, Fertigungs- und Fügetechnologie zur Realisierung des Rotors sind bereitgestellt
- Basis für die Einführung zukünftiger, neuer werkstofftechnischer Strukturansätze wurde erschlossen
 - Nutzung von Armierungskonzepten
 - Multi Material Design
 - Zusätzliche mechanische Gestaltungsfreiheit (Dynamik / Dämpfung)
 -
- Die Integration des Verdichters in einen Rigprüfstand läuft



Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung

Folie 25 > AeroLight > Kocian

AeroLight Werkstoff-Kolloquium > 01.12.09